

На правах рукописи



Гильфанова Светлана Владимировна

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРЕТНОГО ЭФФЕКТА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
СВОЙСТВА ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ И
ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ОСНОВАХ**

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки
древесины

2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и
композитов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Галиханов Мансур Флоридович

Официальные оппоненты: **Махотина Людмила Герцевна**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», профессор кафедры технологии целлюлозы и композиционных материалов;
Дебердеев Тимур Рустамович, доктор технических наук, профессор, общество с ограниченной ответственностью «Инновационно-технологический центр «Автогор»», директор конструкторско-технологического центра компонентов.

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Архангельск).

Защита диссертации состоится « 5 » июня 2025 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.312.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседания Ученого совета А-330, Ученый совет.

В отзыве просим указывать фамилию, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации, структурное подразделение и должность лица, предоставившего отзыв (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней), специальность, по которой автор отзыва защищал свою диссертацию, дату, печать организации.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=546198>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2025 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Екатерина Игоревна
Байгильдеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Процесс фильтрации является неотъемлемым элементом технологий многих отраслей, таких как медицина, пищевая промышленность, машиностроение, химическая промышленность и др. Например, решение задачи повышения качества парфюмерных жидкостей невозможно без совершенствования процессов фильтрации, так как напрямую зависит от модернизации существующих методов и внедрения новых технологий очистки.

В процессе фильтрации жидкостей и газов применяются разнообразные материалы – от фильтровальной бумаги до сложных гетерогенных систем.

Для создания фильтрующих элементов также используются электретенные материалы, то есть материалы с постоянным электростатическим зарядом для захвата частиц. Эти фильтры изготовлены из полимерных волокон, которые подвергаются обработке, создающей длительный электростатический заряд. Электростатический эффект позволяет фильтрующему материалу притягивать и удерживать мелкие частицы (пыль, пыльца, бактерии и др.) с высокой эффективностью, не создавая значительного сопротивления воздушному потоку.

Применение электретенных фильтров широко распространено в системах вентиляции и кондиционирования воздуха, респираторах, а также в различных промышленных процессах, где необходима высокоэффективная фильтрация воздушных потоков. Однако, несмотря на расширяющееся применение электретенных фильтров, остаются нерешенными вопросы, связанные с изменением свойств материалов в процессе их электретенного, а также взаимодействием с окружающими веществами и массопереносом в электрическом поле. Эти аспекты требуют дальнейших исследований.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в теорию и практику производства фильтрующих материалов на целлюлозной и полипропиленовой основах внесли ученые С.А. Пузырев, А.В. Канарский, С.Н. Иванов, А.С. Смолин, А.Г. Кравцов и др. Ведущими исследователями в области создания электретенных волокнистых фильтров являются И.В. Петрянов, В. А. Гольдаде, Weng K., Liao X., Рычков Д.А. и др.

Целью настоящей работы является изучение влияния электретенного эффекта на эксплуатационные свойства фильтрующих материалов на целлюлозной и полипропиленовой основах.

Для реализации поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Изучение влияния электретенного эффекта на структурные и физико-механические свойства целлюлозных фильтров.
2. Изучение влияния электретенного эффекта на сорбционные свойства фильтрующих материалов.
3. Изучение влияния электретенного эффекта на фильтрующую и разделительную способность фильтрующих материалов.
4. Поиск возможных областей использования электретенных фильтрующих материалов.

Научная новизна работы. Работа содержит научно-обоснованные техно-

логические решения, направленные на улучшение комплекса свойств фильтрующих материалов на целлюлозной и полипропиленовой основах:

1. Обнаружено, что электретирующие бумажных фильтровальных материалов повышает их эффективность (разделительную способность) на 7 % за счет притягивания нейтральных частиц включений электростатическими силами заряженных волокон бумаги.

2. Установлено, что прочность целлюлозных волокон уменьшается под воздействием униполярного коронного разряда из-за протекания процессов травления поверхности волокон, о чем свидетельствует повышение их пористости. При этом прочность бумажного фильтрующего материала возрастает благодаря усилению межволоконного взаимодействия и увеличению ζ -потенциала волокон.

3. Замечен синергетический эффект повышения эффективности фильтрации при комбинированном использовании бумажных фильтровальных материалов (верхний слой) и нетканых полипропиленовых полотен (нижний слой), а также электретов на их основе.

4. Впервые показано, что полипропиленовый нетканый материал с электретным эффектом обладает бактериостатическим действием на ряд бактерий, передающихся воздушно-капельным путем и сниженной проницаемостью для аэрозолей и масел благодаря электростатическому притяжению частиц.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость результатов исследования влияния электретного эффекта на свойства фильтрующих материалов на основе целлюлозы и полипропилена заключается в научном обосновании технических критериев, разработке технических решений получения электретных фильтрующих материалов и их применении для очистки различных фильтратов.

Получены электретные фильтрующие материалы на основе целлюлозы и полипропиленовых полотен с улучшенными разделительными показателями.

Показано, что электретный полипропиленовый материал можно использовать для изготовления высокоэффективных одноразовых медицинских масок вследствие бактериостатического эффекта для *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Haemophilus influenzae*, *Haemophilus parainfluenzae*, *Streptococcus pyogenes*, вызывающих заболевания верхних дыхательных путей.

Проведенные исследования показали, что фильтрующие материалы на бумажной и полипропиленовой основе, подвергшиеся обработке в поле отрицательного коронного разряда, обладают высокими эксплуатационными характеристиками и рекомендованы для использования в составе промышленных фильтров типа СНК (супернатантная капсульная кассета), предназначенных для фильтрации жидких моющих средств, что было подтверждено опытно-промышленными испытаниями на производственных мощностях АО «Нэфис косметик» (г. Казань) и задокументировано в акте испытаний.

Методы и методология исследования. Методологической основой исследова-

дования служили положения о структуре и свойствах целлюлозных и полипропиленовых фильтрующих материалов и о возможности повышения фильтрующей способности полимерных материалов при электретировании.

В работе применялись современные методы для изучения структурных, физико-механических, электретных, сорбционных и фильтрующих характеристик материалов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований по изучению влияния электретного эффекта на фильтрующую и разделительную способность бумажных фильтров, а также на их структурные, сорбционные и физико-механические свойства.

2. Данные о влиянии электретного эффекта на фильтрующую и разделительную способность полимерных нетканых материалов.

3. Установленное влияние чувствительности микроорганизмов к обработанным в коронном разряде образцам нетканых полимерных материалов.

Достоверность результатов исследования обеспечивается передовыми методами анализа; использованием как стандартных, так и специализированных методик для оценки характеристик фильтрующих материалов, а также соответствием научных выводов известным теоретическим и экспериментальным данным.

Личный вклад автора в получение результатов, изложенных в диссертации, заключается в формулировании ключевых положений исследования, в постановке и решении теоретических, экспериментальных и практических задач, в проведении экспериментальных исследований, целью которых было изучение характеристик фильтрующих материалов, изготовленных на основе бумаги и полипропилена.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты исследований, выносимые на защиту, относятся к п. 4 «Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлознобумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» паспорта специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины и к п. 2 «Полимерные материалы и изделия: пластмассы, волокна, каучуки, резины, пленки, покрытия, нетканые материалы, натуральные, искусственные и синтетические кожи, клеи, компаунды, композиты, бумага, картон, целлюлозные и прочие композиционные материалы, включая наноматериалы; свойства синтетических и природных полимеров, фазовые взаимодействия; исследования в направлении прогнозирования состав-свойства, технологии изготовления изделий и процессы, протекающие при этом; последующая обработка с целью придания специальных свойств; процессы и технологии модификации; вулканизация каучуков; шивание пластмасс; фазовое разделение растворов; отверждение олигомеров» паспорта специальности 2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на Всероссийской 51-й научной студенческой конференции по

техническим, гуманитарным и естественным наукам (Чебоксары, 2017 г.), Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы науки о полимерах», посвященной 60-летию юбилею кафедры технологии пластических масс (Казань, 2018 г.), V Международной молодежной научной конференции, посвященной памяти почетного профессора УрФУ В. С. Кортова (Екатеринбург, 2018 г.), Четвертом междисциплинарном научном форуме с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии» (Москва, 2018 г.), VI Международной молодежной научной конференции, посвященной 70-летию основания физико-технологического института УрФУ (Екатеринбург, 2019 г.), Всероссийской молодежной научной конференции «За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества» (Курск, 2020 г.), VII Международной молодежной научной конференции, посвященной 100-летию Уральского федерального университета (Екатеринбург, 2020 г.), VIII Международной молодежной научной конференции (Екатеринбург, 2021 г.), Всероссийской научной конференции с международным участием «Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире» (Казань, 2021 г.), 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса» (Курск, 2024 г.), IV Всероссийской научной конференции с международным участием преподавателей и студентов ВУЗов «Актуальные проблемы науки о полимерах» (Казань, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 22 печатные работы, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК, 4 статьи в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus, 13 трудов в прочих журналах и сборниках материалов конференций различного уровня.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 124 страницах, включает 11 таблиц, 43 рисунка, список литературы содержит 175 наименований цитируемых работ.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному консультанту – канд. техн. наук Галеевой Ляйсан Рафаиловне за помощь и поддержку в работе над диссертацией.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, дана общая характеристика работы.

В первой главе представлен обзор литературных данных по структуре, свойствам и способам производства целлюлозно-бумажных фильтров и полимерных нетканых материалов. Показана возможность улучшения потребительских характеристик фильтровальных материалов при воздействии отрицательного коронного разряда.

Во второй главе представлены объект и предмет исследования, описаны методики проведения экспериментов, используемое оборудование. Рассмотрены

методики обработки целлюлозных и полимерных фильтров униполярным коронным разрядом, методы исследования влияния электростатического эффекта на структурные и физико-механические свойства, на сорбционные характеристики, фильтрующую и разделительную способности фильтрующих материалов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований фильтрующих материалов и их обсуждение.

Исследования показали, что фильтровальная бумага плохо электретируется из-за высокой пористости и сквозной структуры, позволяющей заряду достигать нижнего электрода, минуя волокна. Для улучшения электретирующей способности применён метод с использованием лавсановой подложки. Спад заряда у фильтровальных материалов предсказуем и является результатом диффузии носителей заряда из объемных ловушек в приповерхностные и далее – их высвобождения. Скорость высвобождения определяется величиной удельной объемной электрической проводимости материала, которая у полярных материалов на порядок выше.

Полимерные нетканые фильтровальные материалы также имеют невысокие электрестатические свойства, но достаточные для практического применения.

С первого дня и на протяжении четырех недель измерений значения V_s (потенциал поверхности), E (напряженность электростатического поля) и $\sigma_{эф}$ (эффективная поверхностная плотность электрических зарядов) уменьшились почти в 2 раза. Остаточный заряд в образцах сохраняется в течение нескольких месяцев. Снижение уровня свойств со временем обусловлено переносом заряда к ближайшей поверхности полимера и его релаксацией.

Увеличение пористости образцов при обработке коронным разрядом (табл. 1) объясняется химическими реакциями и окислением в поверхностных слоях, сопровождающимися процессами окисления, выделением озона. После такой активации поверхность полимера становится шероховатой.

Таблица 1 – Пористость и воздухопроницаемость бумажных фильтров.

Наименование показателя	Наименование образцов							
	ФБ	ЭФБ	СЛ	ЭСЛ	ЧЛ	ЭЧЛ	КЛ	ЭКЛ
Пористость, мл/мин	2542	2661	1412	1502	3208	3266	1799	2290
Воздухопроницаемость по Гирлею, сек	5	4,4	8,8	8	4	4	7	7

Применительно к бумаге можно говорить о травлении ее поверхности, результатом которого является увеличение шероховатости поверхности.

Значение шероховатости поверхности для образцов «Синяя лента» (СЛ) увеличилось с 2681 мл/мин до 3034 мл/мин (+13 %), для образцов «Красная лента» (КЛ) с 2184 мл/мин до 2386 мл/мин (+9 %). Увеличение шероховатости ведет к возрастанию удельной поверхности волокон в структуре бумаги.

Испытание на определение воздухопроницаемости показало отсутствие влияния обработки бумажных фильтрующих материалов в коронном разряде

на пропускание через них воздуха под давлением. Фильтровальные виды бумаги и картона, как правило, используют для очистки жидкостей, а не газов, так как пористая структура бумаги эффективней работает на улавливание частиц при пропускании через них различных жидкостей.

Незначительное снижение воздухопроницаемости на 1% (с $3840 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \times \text{с}$ до $3800 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \times \text{с}$) электретных полипропиленовых нетканых полотен по сравнению с исходными материалами подтверждается данными литературы и объясняется протеканием окислительных процессов, происходящих при обработке полипропилена в плазме коронного разряда. Образование карбонильных, карбоксильных, гидроксильных и других кислородсодержащих групп в макромолекулах полипропилена изменяет селективную газопроницаемость полотен.

Обработка в коронном разряде способствует увеличению сопротивления продавливанию (рис 1.) для обеззоленных фильтров «СЛ» на 13 % и на 7 % для фильтров «ЧЛ». Фильтровальная бумага (ФБ) имеет пористую структуру с малыми силами связи между элементами структуры.



Рисунок 1 – Сопротивление продавливанию исходной и электретированной ФБ

При воздействии коронного разряда, а также под действием поля осаждаемых на поверхность носителей зарядов может происходить ориентация диполей и дипольных группировок полимера. Это позволяет предположить, что воздействие электрического поля способствует взаимному сближению фибрилл в структуре волокон листа, уменьшению межволоконного пространства и приданию более выраженного ориентированного состояния волокнам.

Электретирование ФБ способствует усилению сил электростатических связей между волокнами. В процессе действия униполярного коронного разряда происходит инжекция носителей зарядов в объем бумажного материала, которые концентрируются на поверхности структурных элементов (волокон, наполнителей и др.). Образование гетерозаряда за счет ориентации полярных группировок целлюлозы, сегментов макромолекул во время электретирования, инжекция носителей заряда внутрь волокна ведет к тому, что поверхность волокон приобретает заряд. На границах их контакта друг с другом и другими компонентами бумажного листа значительно усиливается двойной электрический слой, благодаря чему происходит упрочнение бумаги. Это должно сопровождаться возрастанием ζ -потенциала волокон обеззоленных фильтров. При сравнении результатов для исходных и электретированных обеззоленных фильтров видно, что значение ζ -потенциала волокон ЭСЛ больше на 16 %, чем для волокон СЛ (СЛ: -16,7 мВ, ЭСЛ: -19,7 мВ) и на 13 % для волокон ЭЧЛ в сравнении с волокнами ЧЛ (ЧЛ: -20,5 мВ, ЭЧЛ: -23,7 мВ).

Обработка бумажных фильтров в постоянном коронном разряде приводит к небольшому возрастанию механических свойств (табл. 2) на 0,2 – 1,2 %. Изменение свойств находится на грани экспериментальной погрешности. Однако параметры бумажных фильтров демонстрируют тенденцию к увеличению при электретировании, что позволяет сделать общий вывод о положительном влиянии этой обработки на механические свойства материала.

Таблица 2 – Механические свойства исходных и электретируемых бумажных фильтровальных материалов

Наименование показателя	Наименование материала и направления приложения нагрузки							
	СЛ		ЭСЛ		ЧЛ		ЭЧЛ	
	МН	ПН	МН	ПН	МН	ПН	МН	ПН
Напряжение при разрушении, МПа	8,7	3,2	9,1	3,4	8,5	3,6	9	4
Изменения показателя, %	-	-	+2,2	+3	-	-	+2,8	+5,3
Разрывная длина, м	5411	2857	5464	2869	5234	3203	5362	3254
Изменения показателя, %	-	-	+0,5	+0,2	-	-	+1,2	+0,8

Уменьшение сопротивления раздиранию (табл. 3) при электретировании объясняется тем, что усиленные при обработке связи между волокнами способствуют их прочному удержанию в структуре листа.

Таблица 3 – Результаты по определению сопротивления раздиранию

Наименование образцов	Сопротивление раздиранию (метод Эльмендорфа), мН	
	МН	ПН
ФБ	1067	1197
ЭФБ	994	1132
ЧЛ	1304	1369
ЭЧЛ	1231	1283

Под воздействием раздирающих нагрузок происходит разрыв волокон, а не их полное выдергивание. Согласно теории Ванн ден Аккера, энергия, затрачиваемая на разрыв волокон, значительно меньше энергии, необходимой для их вытягивания из листа бумаги. Инжектированные носители заряда вызывают деструктивные процессы в целлюлозных волокнах, аналогичные тем, что происходят при обработке полимеров коронным разрядом. Деструкция целлюлозы происходит из-за разрыва 1,4-ацетальной связи с образованием карбоксильных групп.

Уменьшение краевого угла при электретировании (рис. 2) связано с физико-химическими и механическими изменениями в структуре бумаги под действием коронного разряда, повышающего шероховатость поверхности волокон и смачиваемость поверхности бумаги. Увеличение количества активных групп на поверхности бумаги после коронной обработки облегчает образование водородных связей с полярными молекулами воды, что приводит к ее быстрому растеканию.



Рисунок 2 – Краевой угол смачивания бумажных фильтров водой

Эффективность полимерных и бумажных электретенных фильтровальных материалов по обеспечению чистоты фильтрата была изучена при определении разделительной способности (рис 3). Фильтрат – водно-спиртовой раствор, в который для оценки эффективности фильтрации вводили целлюлозные волокна в определённом количестве, имитируя загрязнённую жидкость.

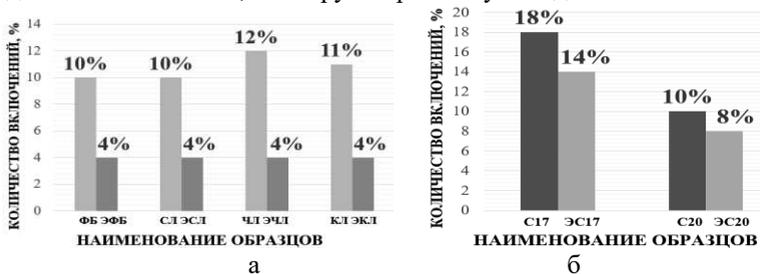


Рисунок 3 – Разделительная способность: а – исходной бумаги и бумаги, обработанной в коронном разряде; б – нетканых полипропиленовых полотен, полученных методом «Спанбонд» плотностью 17 (С17) и 20 (С20) г/м² и электретен на их основе

Обработка бумажных образцов привела к уменьшению количества частиц в фильтрате почти в два раза. Осаждение частиц на заряженных образцах фильтровальной бумаги происходит из-за притягивания нейтральных частиц включений электростатическими силами заряженных волокон бумаги. Способность электрического поля фильтрующего материала распространяться на значительные расстояния от поверхности повышает его эффективность. Придание электретенного состояния нетканым полотнам привело к уменьшению количества частиц в фильтрате в среднем на 20 – 22 % по сравнению с исходными образцами.

Придание бумажным образцам электретенного состояния способствует увеличению времени прохождения фильтрата через фильтры в среднем в 1,5 раза (рис. 4а). Данное явление объясняется влиянием поля электрета на протекание диффузионных процессов. Поляризованный заряд создает энергетический барьер, влияющий на прохождение фильтрата через объем бумаги.

Время фильтрации после придания полимерным образцам электретенного состояния увеличивается почти в 1,3 раза (рис. 4б). Изменение скорости

Незначительное увеличение времени впитываемости образцов при обработке в коронном разряде (ФБ: 4,2 сек до 5,04 сек; КЛ: 5,46 сек до 5,76 сек; ЧЛ: 4,68 сек до 4,72 сек) объясняется экранированием заряда молекулами воды, ослаблением потенциала поверхности, активным смачиванием, прохождением воды сквозь толщу бумаги.

массопереноса объясняется тем, что коэффициент диффузии диэлектрических жидкостей обратно пропорционален динамической вязкости, при этом вязкость возрастает в электрическом поле, следовательно, действие электрического поля приводит к уменьшению коэффициента диффузии.

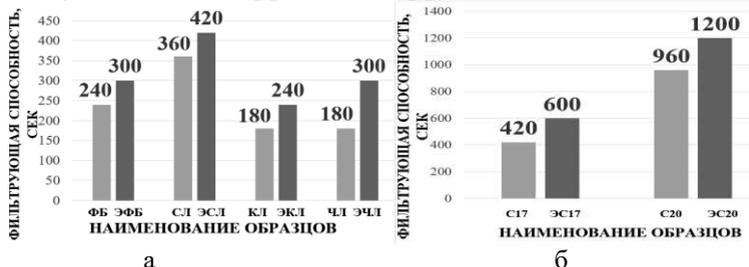


Рисунок 4 – Скорость фильтрации: а – исходной фильтровальной бумаги и бумаги, обработанной в коронном разряде; б – нетканых полипропиленовых полотен, полученных методом «Спанбонд» плотностью 17 и 20 г/м² и электретов на их основе

Придание электретного состояния нетканым полотнам и обеззоленным бумажным фильтрам привело к уменьшению количества частиц в фильтрате в среднем на 33 – 40 % по сравнению с исходными образцами (рис. 5а), при этом время фильтрации после придания образцам электретного состояния увеличивается в 1,3 раза (рис. 5б).

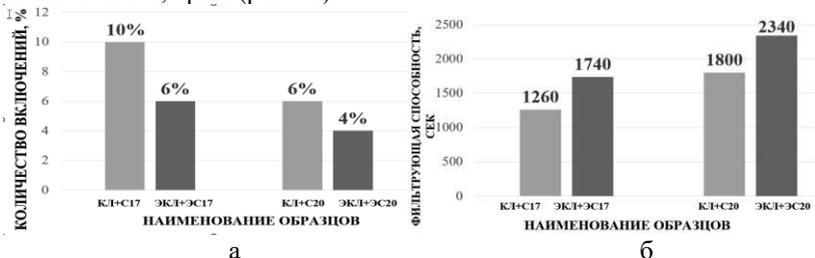


Рисунок 5 – Разделительная способность (а) и фильтрующая способность (б) нетканых полипропиленовых полотен, полученных методом «Спанбонд» плотностью 17 и 20 г/м² и обеззоленного фильтра «Красная лента» и электретов на их основе

Двуслойный фильтрующий материал, состоящий из обеззоленного фильтра «Красная лента» и нетканого полипропиленового полотна «Спанбонд», демонстрирует синергетический эффект после придания ему электретного эффекта. Обеззоленный фильтр обладает высокой сорбционной способностью, а полипропиленовый нетканый материал – превосходными механическими свойствами и стабильностью структуры. В совокупности с электретным эффектом, эти материалы создают усиленное электростатическое поле, которое повышает количество удерживаемых мелкодисперсных частиц, что приводит к повышению общей эффективности фильтра и улучшению его эксплуатационных характеристик. Электретирование позволяет достигнуть подобного эффекта и в

отдельности для бумажных и полипропиленовых фильтровальных материалов.

Результаты по определению фильтрующей способности обеззоленных фильтров водно-нефтяной эмульсии показали, что воздействие коронного разряда способствует увеличению пропускной способности фильтров (для КЛ с 330 сек до 570 сек и для СЛ с 753 сек до 1590 сек). Поляризационный заряд создает энергетический барьер, влияющий на прохождение фильтрата через бумажные фильтры.

Увеличение эффективности разделения эмульсии типа «нефть в воде» в результате коронной обработки на 25 % (СЛ) и 33 % (КЛ) подтверждает ранее доказанное благоприятное влияние коронного разряда на работу бумажных фильтров (табл. 4).

Таблица 4 – Значения ХПК фильтратов при разделении водомасляной эмульсии обеззоленными фильтрами и электретами на их основе

Образец	Исходная эмульсия	КЛ	ЭКЛ	СЛ	ЭСЛ
Значения ХПК, мгО/дм ³	13000	6000	4000	4000	3000

Результаты исследований фильтрующей способности нетканых полипропиленовых полотен, полученных методом «Мелтблаун» плотностью 25 г/м² (M25) показывают, что электретные полипропиленовые полотна имеют значительно меньшую проницаемость аэрозоля хлорида натрия D_{NaCl} и масляного спрея Doil в сравнении с исходными образцами при том же показателе сопротивления воздуха (табл. 5).

Таблица 5 – Разделительная способность нетканых полипропиленовых полотен «Мелтблаун» плотностью 25 г/м² и электретов на их основе

Образец	Аэродинамическое сопротивление, Па	Коэффициент проникания D _{NaCl} , %	Коэффициент проникания D _{oil} , %
M25	69	7,66	11,07
ЭM25	65	0,73	1,50

Образцы M25, поляризованные в коронном разряде, имеют меньшую скорость фильтрации (4,5 сек), чем неполяризованные (2,4 сек). Униполярный коронный заряд материалов приводит к образованию энергетического барьера. Для его преодоления расходуется движущая сила потока жидкости через волокнистый материал. Поляризационный заряд влияет на процессы смачивания, абсорбции и диффузии, которые всегда происходят в процессе фильтрации через нетканые материалы из полипропилена.

Влияние электретного эффекта на развитие различных микроорганизмов показало, что при испытании электретных образцов на ряде культур было отмечено проявление бактериостатического эффекта. Избирательная активность в отношении микроорганизмов была проявлена на культурах рода стафилококков, стрептококков. Эти виды бактерий объединяет то, что им характерен воздушно-пылевой, воздушно-капельный путь заражения. Бактериям, которые остались устойчивы к действию электретного эффекта характерно то, что они преобладают и размножаются в желудочно-кишечном тракте и мочеполовой системе. Поэтому вероятность их распространения через

ингаляционный путь минимальна. Микроорганизмы, на которых был проявлен бактериостатический эффект имеют сходство – они являются грамположительными. Грамотрицательные бактерии имеют защитную экранировку, изолирующую клеточную стенку бактерий от воздействия коронного разряда.

В четвертой главе представлены разработанные технологические схемы производства фильтровальной бумаги и полимерных нетканых фильтровальных материалов, обработанных в коронном разряде.

Экономический расчет показал, что обработка коронным разрядом приводит к незначительному удорожанию продукции (1 руб./м² для полимерных полотен и 2 руб./м² для бумажных фильтров). Внедрение обработки коронным разрядом практически не увеличивает стоимость продукции, делая этот процесс экономически целесообразным и не влияющим на конечную цену товара.

Разработан модернизированный фильтр типа СНК, включающий полимерные и бумажные электретируемые фильтрующие слои.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обнаружено, что при электретировании возрастает пористость фильтрующих материалов: для фильтровальной бумаги марки ФСШ с 2542 до 2661 мл/мин; для обеззоленных фильтров «Синяя лента» с 1412 до 1502 мл/мин; для обеззоленных фильтров «Черная лента» с 3208 до 3266 мл/мин – за счет травления её поверхности и, как следствие, увеличения удельной поверхности волокон в структуре бумаги. Обработка бумажных фильтроматериалов в поле коронного разряда повышает их механические свойства на 0,2 – 1,2 % за счет усиления межволоконных связей. Это связано с ориентацией и упорядочиванием структурных элементов целлюлозно-бумажного материала и ростом потенциала двойного электрического слоя на поверхности волокон. Под действием носителей заряда из коронного разряда образуется гетерозаряд, что также способствует увеличению ζ -потенциала электретных фильтрующих материалов на 18 % по сравнению с исходными.

2. При обработке в постоянном коронном разряде замечено уменьшение краевого угла смачивания водой для бумажных обеззоленных фильтров «Синяя лента» на 3,1° и «Черная лента» на 1,4°, что объясняется увеличением шероховатости поверхности волокон.

3. Выявлено увеличение времени прохождения водно-спиртового раствора через электретные бумажные фильтровальные материалы в среднем в 1,5 раза. При электретировании полипропиленовых нетканых полотен время фильтрования испытуемых жидкостей увеличивается в 1,3 раза. Это связано с возникновением энергетического барьера в виде электретного заряда. При этом количество включений, попавших в фильтрат, уменьшилось в среднем на 7 % для бумажных фильтроматериалов и на 20 – 22 % для нетканых полипропиленовых полотен. Показано увеличение эффективности разделения эмульсии типа «нефть в воде» после коронной обработки – на 25 % для обеззоленных фильтров «Синяя Лента» и на 33 % для фильтров «Красная

Лента». Применение электретиrowанного двухслойного материала, состоящего из бумажного обеззоленного фильтра и нетканого полотна, позволяет улучшить чистоту получаемого фильтра на 33 – 40 % по сравнению с исходными образцами. Двухслойный фильтрующий материал, состоящий из обеззоленного фильтра «Красная лента» и нетканого полипропиленового полотна «Спанбонд», демонстрирует синергетический эффект.

4. Фильтрующий полипропиленовый нетканый материал с электретным эффектом обладает бактериостатическим эффектом по отношению к бактериям *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Haemophilus influenzae*, *Haemophilus parainfluenzae*, *Streptococcus pyogenes* благодаря электростатическим силам, воздействующим на микроорганизмы, замедляя их рост и активность. Впервые выявлено, что электретные полипропиленовые полотна «Мелтблаун» имеют меньшую проницаемость по отношению к аэрозолю хлорида натрия на 7 % и масляному спрею на 9 % в сравнении с исходными образцами при том же показателе сопротивления воздуха, что объясняется способностью притягивать нейтральные частицы за счет электрических сил заряженных волокон.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования связаны с углубленным исследованием свойств фильтрующих материалов на основе целлюлозы и полипропилена, а также с расширением возможностей их промышленного применения. Полученные результаты открывают новые направления для оптимизации технологии производства и эксплуатации данных материалов, включая создание фильтровальных систем для очистки воздуха, воды и газов в различных отраслях промышленности.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, входящие в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Галиханов М. Ф. Нетканые полипропиленовые полотна с бактериостатическим эффектом для медицинских масок / М.Ф. Галиханов, И.С. Абасева, Л.Р. Галеева, С.В. Гильфанова, А.К. Загрутинова, И.В. Сидорова, И.И. Яруллина // Вестник технологического университета. – 2019. – № 356. – С. 56-59.

2. Гильфанова С. В. Влияние униполярного коронного разряда на эксплуатационные свойства бумажных фильтров / С. В. Гильфанова, М. Ф. Галиханов, В. Н. Сунайт, А. Г. Кузнецов, Л.Р. Галеева // Вестник технологического университета. – 2020. – № 5. – С. 53-56.

3. Галеева Л. Р. Упрочненные фильтровальные материалы на бумажной основе / Л.Р. Галеева, М.Ф. Галиханов, С.В. Гильфанова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – 2021. – № 2(18). – С. 7-15.

4. Кравцов А.Г. Применение модифицированных полимерных волокнистых материалов в качестве фильтроэлементов для очистки многофазных сред / А.Г. Кравцов, С.В. Зотов, М.В. Тумилович, С.В. Гильфанова // Вестник технологического университета. – 2021. – № 11. – С. 51-57.

5. Гильфанова С.В. Изменение геометрических и сорбционных свойств бумажных обеззоленных фильтров при их обработке в поле коронного разряда / С.В. Гильфанова, М.Ф. Галиханов, Л.Р. Галеева // Вестник технологического универ-

ситета. – 2022. – № 9. – С. 101-105.

Статьи в научных изданиях, сборниках научных трудов и материалов конференций, индексируемых в базах данных Scopus:

6. Gilfanova S.V. Influence of electret effect on filter and dividing capabilities of polymer nonwoven materials / S.V. Gilfanova, M.F. Galikhanov, L.R. Galeeva // AIP Conference Proceedings 2174. – 2019. – V.020214. – P. 020214-1-020214-4.

7. Guliakova A.A. Investigation of electret and filtering properties of polypropylene-based nonwoven fabrics and its composites with 2 vol% of silicon dioxide inclusions / A.A. Guliakova, M. F. Galikhanov, L. R. Galeeva, S.V. Gilfanova, Peng Fang // IEEE Transaction on dielectrics and electrical insulation. – 2020. – V.27. – № 5 – P. 1656-1661.

8. Gilfanova S.V. Influence of unipolar corona discharge on mechanical and operating properties of paper ashless filters / S.V. Gilfanova, M.F. Galikhanov, L.R. Galeeva, V.N. Sunait, A.G. Kuznetsov // AIP Conference Proceedings 2313. – 2020. – V.27. 5 – P. 060022-1-060022-5.

9. Галеева Л.Р. О причинах изменения механических свойств бумажных обеззоленных фильтров при их обработке в униполярном коронном разряде / Л.Р. Галеева, М.Ф. Галиханов, С.В. Гильфанова // Химия растительного сырья. – 2021. – № 1. – С. 337-343.

Труды в прочих изданиях:

10. Мусина Л.Р. Управление эксплуатационными свойствами фильтровальной бумаги с помощью униполярного коронного разряда / Л.Р. Мусина, М.Ф. Галиханов, С.В. Волкова // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы IV международной научно-технической конференции, Архангельск. – 2017. – С. 114-119.

11. Нафикова А.Р. Изучение эксплуатационных свойств материалов на бумажной и полипропиленовой основах / А.Р. Нафикова, С.В. Волкова, М.Ф. Галиханов, Л.Р. Мусина // Наука. Студент. Университет: Всероссийская 51-я научная студенческая конференция по техническим, гуманитарным и естественным наукам, Чебоксары. – 2017. – С. 376.

12. Волкова С.В. Влияние электретного эффекта на прочностные характеристики обеззоленных фильтров / С.В. Волкова, Л.Р. Мусина // Физика. Технологии. Инновации: тезисы докладов V Международной молодежной научной конференции, посвященной памяти почетного профессора УрФУ В. С. Кортова, Екатеринбург. – 2018. – С. 34-35.

13. Гильфанова С.В. Электретный эффект в полимерном нетканом материале и его влияние на фильтрующую способность / С.В. Гильфанова, М.Ф. Галиханов, Л.Р. Галеева // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы науки о полимерах – 2018», Казань. – 2018. – С. 172.

14. Волкова С.В. Изучение комплекса свойств волокнистых полимерных материалов / С.В. Волкова, Л.Р. Мусина // Сборник материалов Четвертого междисциплинарного научного форума с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», Москва. – 2018. – С. 914.

15. Gilfanova S.V. Influence of electret effect on filter and dividing capabilities of polymer nonwoven materials / S.V. Gilfanova, L.R. Galeeva, M.F. Galikhanov // Физика. Технологии. Инновации: тезисы докладов VI Международной молодежной научной конференции, посвященной 70-летию основания физико-технологического института

УрФУ, Екатеринбург. – 2019. – С. 94-95.

16. Гильфанова С.В. Электретные свойства бумажных обеззоленных фильтров / С.В. Гильфанова, Л.Р. Галеева, М.Ф. Галиханов // За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества: Сборник научных статей Всероссийской молодежной научной конференции, Курск. – 2020. – С. 334.

17. Гильфанова С.В. Влияние электретного эффекта на бумажные обеззоленные фильтры / С.В. Гильфанова, М.Ф. Галиханов, Л.Р. Галеева // Физика. Технологии. Инновации: тезисы докладов VII Международной молодежной научной конференции, посвященной 100-летию Уральского федерального университета, Екатеринбург. – 2020. – С. 757-758.

18. Гильфанова С.В. Влияние электретного эффекта на геометрические свойства бумажных обеззоленных фильтров / С.В. Гильфанова, М.Ф. Галиханов, Л.Р. Галеева // Физика. Технологии. Инновации: тезисы докладов VIII Международной молодежной научной конференции, Екатеринбург. – 2021. – С. 775-776.

19. Гильфанова С.В. Влияние коронного разряда на поверхностные свойства бумажных обеззоленных фильтров / С.В. Гильфанова, М.Ф. Галиханов, Л.Р. Галеева // Кирпичниковские чтения: XV Международная конференция молодых ученых, студентов и аспирантов «Синтез и исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений», Казань. – 2021. – С. 188-189.

20. Шабаева А.Б. Разделение водонефтяной эмульсии полиамидными мембранами, обработанными коронным разрядом / А.Б. Шабаева, В.О. Дряхлов, И.Г. Шайхiev, С.В. Гильфанова, М.Ф. Галиханов // Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, Казань. – 2021. – С. 508-513.

21. Гильфанова С.В. Улучшение фильтрующих свойств бумажных фильтров методом электретиования / С.В. Гильфанова, Л.Р. Галеева, М.Ф. Галиханов // Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса: Сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции, Курск. – 2024. – С. 23-27.

22. Галеева Л.Р. Электретные нетканые материалы: инновационные фильтры с бактериостатическими свойствами для медицинских масок / Л.Р. Галеева, М.Ф. Галиханов, С.В. Гильфанова // Актуальные проблемы науки о полимерах: материалы IV Всероссийской научной конференции (с международным участием) преподавателей и студентов вузов, Казань. – 2024. – С. 329-331.